文章编号:1000-4939(2023)02-0434-09

大弯径比挠性弯管内气固两相流冲蚀特性研究

霍志远[1],王跃社[1],苏敏文[2,3]

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,710049 西安;
2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司,712000 咸阳;
3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,712000 咸阳)

摘 要:以 90°大弯径比挠性弯管为研究对象,基于离散相模型和 General 冲蚀模型,利用 Fluent 数值仿真软件,开展不同工况下气相进口速度、夹带固体颗粒质量流量、弯管肋条及弯径比等影响因素对弯管内气固两相流冲蚀特性的数值模拟研究。研究结果表明:弯管纵切面气固两相流场速度分布存在分离现象;弯管的最大冲蚀速率随气相进口速度的增长呈指数关系,随颗粒质量流量的增长呈线性关系,随肋条数目的增长先减小后略微增大最后趋于稳定;大弯径比弯管内部流场二次流强度小且肋条的存在使弯管的耐冲蚀性能得到一定的提升;弯管冲蚀最严重区域发生在弯管沿流动方向偏转 26°左右夹角的区域且呈现出 V 型冲蚀形貌,这种现象是由于弯管处独特的颗粒运动轨迹决定的;在弯管沿流动方向 60° ~80°夹角范围内出现沟槽状冲蚀形貌,它是由于颗粒在弯管内的二次及多次碰撞。

关键词:冲蚀磨损;气固两相流;颗粒轨迹;最大冲蚀速率
中图分类号:O359 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.021

Study on erosion characteristics of gas-solid two-phase flow in a flexible elbow with a large bending diameter ratio

HUO Zhiyuan[1], WANG Yueshe[1], SU Minwen[2,3]

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
2. Downhole Technology Operation Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co. LTD., 712000 Xianyang, China;
3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, 712000 Xianyang, China)

Abstract: This paper is intended for the study of a right-angle flexible elbow with a large bending diameter ratio. A numerical simulation on the erosion characteristics of gas-solid two-phase flow in the elbow is conducted employing the Fluent simulation software package, in which such factors as gas inlet velocity, mass flow rate of entrained solid particles, elbow ribs and bending diameter ratio under different working cases are considered based on the discrete phase model and the General erosion model. The results show that the velocity distribution of the gas-solid two-phase flow field in the longitudinal section of the elbow is separa-

收稿日期:2021-11-20 **修回日期**:2022-09-23
通信作者:王跃社,教授。E-mail: wangys@mail.xjtu.edu.cn
引用格式:霍志远,王跃社,苏敏文. 大弯径比挠性弯管内气固两相流冲蚀特性研究[J]. 应用力学学报,2023,40(2):434-442.
HUO Zhiyuan, WANG Yueshe, SU Minwen. Study on erosion characteristics of gas – solid two – phase flow in a flexible elbow with a large bending diameter ratio[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):434-442.

ted. The maximum erosion rate of elbow varies exponentially with the increase of the gas inlet velocity, and linearly with the increase of the particle mass flow rate. As the number of ribs embedded in the inner wall of elbow increases, the erosion ratio firstly decreases and then slightly increases and finally stabilizes. The strength of the secondary flow in the large bend is smaller than that in the elbow, and the erosion resistance of the elbow improves to a certain extent due to the existence of ribs. The severely eroded area in the elbow occurs in the area where the elbow deflects along the flow direction at an angle of about 26° and presents V-shaped erosion morphology, which is caused by the special particle movement trajectory at the elbow. The groove-like erosion morphology appears within the angle range of 60° – 80° along the flow direction, which is due to the secondary and multiple collisions of particles in the elbow.

Key words: erosion wear; gas-solid two-phase flow; particle trajectory; maximum erosion rate

目前管道运输是我国油气运输的主要方式，在天然气开采过程中很少有单相天然气存在的情况，一般都会夹带着粉尘、砂粒等固体颗粒，这些固体颗粒与管道中输送的气体构成气固两相流动体系，而固体颗粒等杂质对管道和输运设备的安全性有很大的危害，冲蚀磨损是造成材料破坏和结构失效的重要原因[1]。大弯径比挠性弯管（弯径比为弯管曲率半径与管道直径之比，一般弯径比 >2.5 称之为大弯径比弯管）是天然气长距离输运中不可或缺的连接件，若输运气体夹带颗粒流经弯管等局部位置时，固体颗粒会对管道壁面产生冲蚀磨损，因此对管道弯管局部位置的冲蚀磨损研究具有重要意义。目前计算流体动力学（CFD）已被广泛使用于冲蚀磨损的数值模拟计算中，EDWARDS 等[2]利用 Ahlert 冲蚀模型对弯径比分别为 1.5 和 5 的 90°弯管进行冲蚀模拟研究，由于颗粒与管壁激烈的碰撞导致在弯管外拱处产生椭圆形的冲蚀磨损形貌。CHEN 等[3]以弯径比为 1.5 的标准弯头为研究对象，研究其冲蚀形貌以及固体颗粒的运动轨迹，结果表明弯管处冲蚀形貌为 V 型。JASHANPREET 等[4]研究了浆液输送回路弯管内固体颗粒冲蚀，数值模拟结果表明冲蚀率随流速、粒径和管径的增大而增大。较低的冲蚀磨损发生在弯管入口附近并在弯曲曲率的 60°附近达到最大值。为了改善气固两相流管道的抗冲蚀性能，目前学者们已研究出多种方法，例如 SONG 等[5]研究发现，在直管段内壁布置一定数量的肋条可缓解两相流动中管道壁面产生的冲蚀磨损。林建忠等[6]通过实验以及数值模拟研究发现在管道壁面上开纵向较浅的沟槽可以有效地减轻固体颗粒物对其壁面产生的冲蚀磨损。季楚凌等[7]通过建立横槽、纵槽和凹坑等仿生表面加厚弯管模型，经数值模拟研究发现采用仿生表面技术可以显著改善弯管的抗冲蚀性能，其中横槽的抗冲蚀性能最好。文献[5-7]都是通过改变壁面形状来影响固体颗粒的运动轨迹从而提高管道的抗冲蚀性能。一些研究人员[8-9]还发现设计参数也是影响管道冲蚀磨损的重要因素，例如弯径比、弯管曲率和弯管角度。WANG 等[10]研究了不同弯管半径下的弯管冲蚀磨损，结果表明增大弯管曲率是减小由冲蚀造成弯管整体磨损的有效途径。

目前很多研究中物理模型都是根据无缝弯头规格标准建立，弯径比大约为 1.5 的管道，针对大弯径比弯管的研究较少。本研究以 90°大弯径比挠性弯管为研究对象，通过数值模拟的方法研究挠性弯管夹带固体颗粒的冲蚀磨损性能，分析影响弯管冲蚀性能的相关因素，并与小弯径比以及光滑弯管进行对比，探讨大弯径比以及挠性弯管的特殊结构对弯管冲蚀性能的影响。

1 理论计算模型

1.1 离散相控制方程

基于拉格朗日坐标系对连续气相中的离散相，即固体颗粒进行运动追踪，对颗粒运动方程积分从而得到颗粒的运动轨迹。Fluent 中的离散相模型（DPM）忽略固体颗粒之间的碰撞，忽略固体颗粒的破碎，故只适用于固相体积分数小于 10% 的气固两相流计算[11]。颗粒运动的控制方程由牛顿第二运动定律得出[12]，即

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_P - \rho)}{\rho_P} - \frac{1}{\rho_P}\nabla P_S \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_P d_P^2}\frac{C_D Re}{24} \quad (2)$$

其中：F_D 为曳力系数；u 为连续相流体的速度，m/s；u_p 为离散相颗粒的速度，m/s；ρ_p 为颗粒密度，kg/m^3；ρ_p 为流体密度，kg/m^3；∇P_S 为固相压力；μ 为动力黏度，Pa·s；d_p 为颗粒直径，m；C_D 为单颗粒表观曳力系数；Re 为相对雷诺数。

在气固两相流场中，颗粒在运动过程中不免要与固体壁面发生接触行为，这必然会影响流场中颗粒的运动轨迹。若将颗粒认为是刚性球体，与壁面发生接触行为时要在接触点发生回弹，其回弹模型示意图如图 1 所示。颗粒以入射速度 v_1 向壁面运动，壁面与运动方向的夹角 θ 称为冲击角，颗粒在接触点与壁面发生碰撞出现能量损失，回弹速度为 v_2，运动过程中能量的损失与转移使得颗粒的回弹速度低于入射速度。恢复系数 e 用来表征这种碰撞特性，即碰撞前后颗粒速度分量的比值[13]。本研究选择 FORDER[14] 的法向恢复系数 e_n 和切向恢复系数 e_t 来描述颗粒与壁面的碰撞过程，其方程如下所示。

$$e_n = \frac{v_{n2}}{v_{n1}} = 0.988 - 0.78\theta + 0.19\theta^2 - 0.024\theta^3 + 0.027\theta^4 \quad (3)$$

$$e_t = \frac{v_{t2}}{v_{t1}} = 1 - 0.78\theta + 0.84\theta^2 - 0.21\theta^3 + 0.028\theta^4 - 0.022\theta^5 \quad (4)$$

其中：e_n 为法向恢复系数；e_t 为切向恢复系数；v_{n1} 为法向入射速度；v_{n2} 为法向回弹速度；v_{t1} 为切向入射速度；v_{t2} 为切向回弹速度；θ 为冲击角。

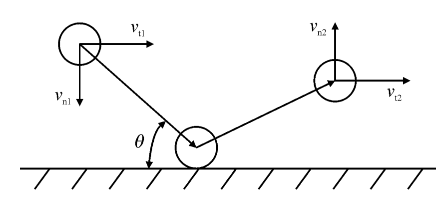


图 1 颗粒与壁面碰撞回弹模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle and wall collision rebound model

1.2 冲蚀模型

HUSER 等[15]研究了管道中的砂粒冲蚀磨损，并提出壁面冲击角函数进行冲蚀计算。颗粒冲蚀速率可以在壁面边界上进行监测，侵蚀速率定义为

$$V = \sum_{p=1}^{N} \frac{m_p C(d_p) f(\gamma) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (5)$$

其中：V 为壁面冲蚀速率，kg·m^{-2}·s^{-1}；N 为碰撞颗粒数目；m_p 为颗粒质量；$C(d_p)$ 为颗粒直径的函数；γ 为颗粒路径与壁面的冲击角；$f(\gamma)$ 为冲击角的函数；v 为颗粒相对速度；$b(v)$ 为颗粒相对速度的函数；A_{face} 为壁面网格面积。Fluent 中 $f(\gamma)$ 和冲击角度 γ 之间的数值关系利用线性分段函数描述，可通过激波脉冲试验获得[15-16]，当冲击角 γ 为 0°、20°、30°、45°、90°时，对应的冲击角函数 $f(\gamma)$ 分别为 0、0.8、1.0、0.5、0.4。

2 数值模拟

2.1 几何模型建立

含砂管道冲蚀实验系统由离心风机、砂罐、流量计、管道、砂箱等组成，如图 2 所示。管道冲蚀磨损主要发生在挠性弯管部分，故本研究选取 90°大弯径比弯管作为研究对象进行建模。挠性弯管结构如图 3 所示，其结构由互锁的“S”型钢带组成，挠性管结构具有良好的抗坍塌性与耐冲蚀性。

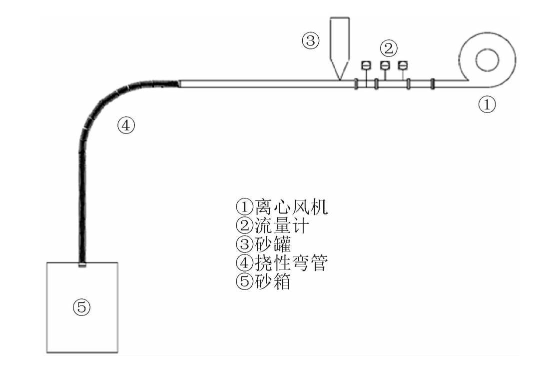


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

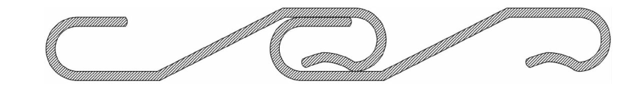


图 3 挠性弯管结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flexible elbow structure

根据挠性弯管结构建立弯管内流体域模型进行数值模拟，采用肋条结构来近似表征流体域结构，几何模型由入口直管段 L_1、弯管部分和出口直管段 L_2 组成，其流体域模型几何尺寸如图 4 所示，弯管进出口管径 $D = 25$ mm，弯管曲率半径 $R = 200$ mm，弯径比 $R/D = 8$，为了保证流场充分发展以及计算结果的准确性，取弯管进出口直管段长度为 6 倍管径即

$L_1 = L_2 = 6D = 150$ mm。肋条结构几何尺寸如图 5 所示，肋条截面直径 $D_1 = 28$ mm，肋条宽度 $h = 2$ mm。

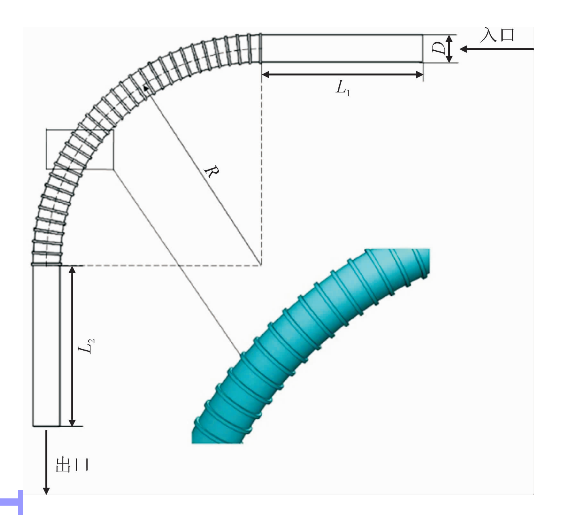


图 4　弯管内流体域几何模型图

Fig. 4　Geometry model diagram of fluid domain in elbow

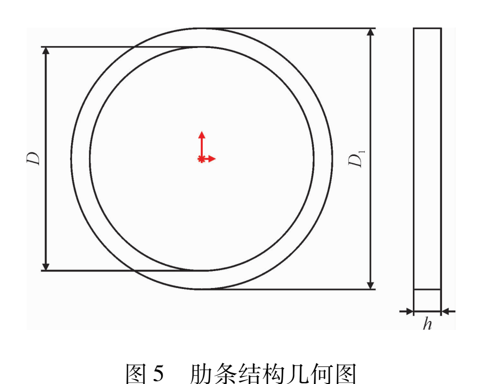


图 5　肋条结构几何图

Fig. 5　Geometry of rib structure

2.2　边界条件

本模拟采用 Coupled 算法，流体相湍流模型选用 Realizable k-ε 模型，利用 DPM 模型模拟颗粒的运动轨迹，颗粒相湍流采用随机游走模型描述，采用 Fluent 中的 General 冲蚀模型进行冲蚀计算。

General 冲蚀模型的参数设置如下：冲击角函数采用分段函数定义，当冲击角为 0°、20°、30°、45°、90°时函数值分别为 0、0.8、1.0、0.5、0.4，粒子直径函数设置为常数 1.1684×10^{-9}，速度指数取 2.4。弯管入口边界条件采用速度入口，空气作为连续相介质，进口速度大小分别取为 10、15、20、25、30、35 m/s，出口边界采用自由出流，壁面无滑移。离散相颗粒由进口面释放，且颗粒的初始速度与流体入口速度一致，颗粒相在壁面处的边界条件类型设为反弹，在出口处设置为逃逸。颗粒的质量流量分别取为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 kg/s，颗粒密度为 2 650 kg/m^3，颗粒直径为 0.15 mm。利用离散相模型时要控制颗粒体积分数小于 10%，当颗粒质量流量为 1 kg/s，入口速度为 10 m/s 时，颗粒在弯管中的体积分数为 7.69%，故所有工况满足 Fluent 离散相模型计算条件。

2.3　网格无关性验证

本模拟采用非结构化网格，为了准确获得弯管壁面及肋条结构处的冲蚀分布情况，对肋条部分进行局部加密。为了得到合适的网格密度保证数值模拟的精度进行网格无关性验证，图 6 所示为最大冲蚀速率 E_{max} 与网格数量 n 之间的关系曲线图。由图可得在网格数量较小时，弯管最大冲蚀速率随网格数量的增大呈现波浪型不规则变化，当网格数量达到 200 万左右后，弯管最大冲蚀速率趋于稳定。因此在满足计算精度的条件下，尽量减小模拟计算量，本模拟的网格数量为 226 万，网格质量可满足计算要求。

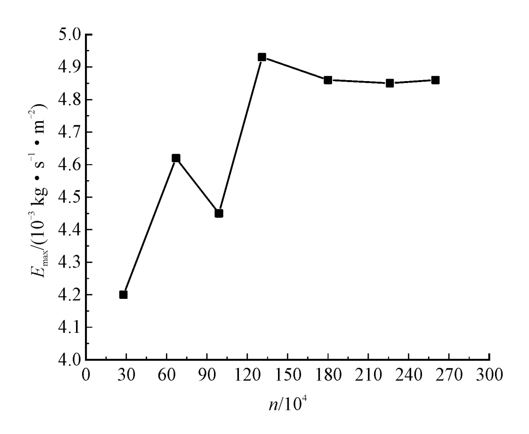


图 6　最大冲蚀速率随网格数量变化曲线

Fig. 6　Curve of maximum erosion rate with the number of grids

2.4　模型验证

为了验证模型准确性，与 VIEIRA 等[17]的模拟结果进行了对比，如图 7 所示。以文献[17]中的边界条件为依据，利用 Fluent 进行气流中沙粒对弯管的冲蚀模拟，气相速度取为 23 m/s，颗粒直径分别取为 150、300 μm，弯管材料为 316，设置密度为 7 980 kg/m^3。根据模拟结果弯管的冲蚀形貌与文献中基本一致，最大冲蚀速率与文献中也比较接近，误差分别为 2.25% 和 6.5%，在误差允许范围内，故本研究模型可行。

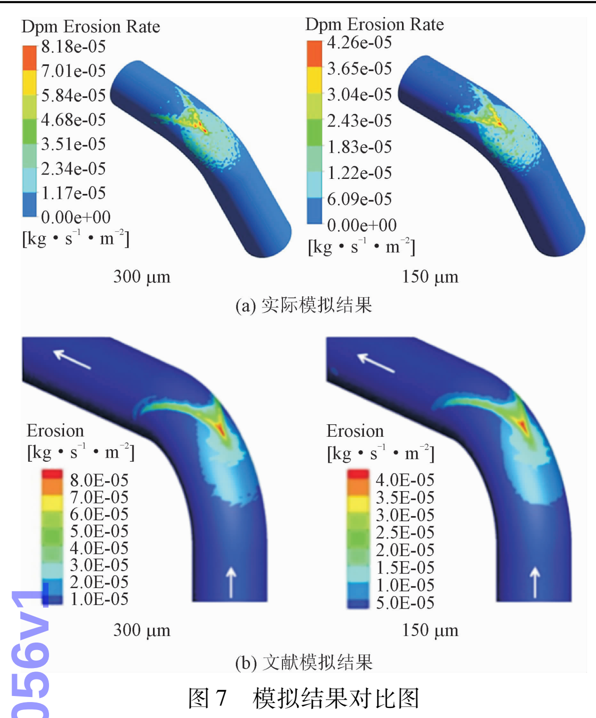


图 7 模拟结果对比图

Fig. 7 Comparison chart of simulation results

3 数值模拟结果与分析

3.1 连续相流场分析

图 8 所示为气相进口速度在 10 ~ 35 m/s，颗粒直径为 0.15 mm，颗粒质量流量为 1 kg/s 的条件下弯管纵切面在同一标尺下的速度分布云图。

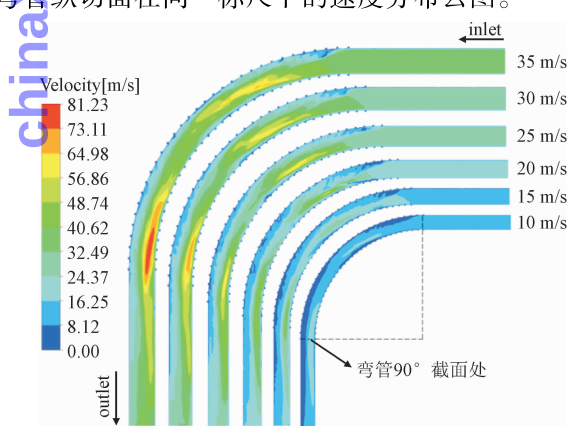


图 8 不同入口速度下弯管纵切面速度流场分布图

Fig. 8 Distribution of velocity flow field in longitudinal section of elbow at different inletvelocity

连续相流体以入口速度稳定地流过弯管入口直管水平段，继续流动由于流向发生改变速度分布开始出现明显的分离现象，弯管外侧流速变小，弯管内侧流速变大。流体流经弯管时由于受到离心力作用与管壁发生碰撞与摩擦，造成能量损失引起速度降低，从而外侧流速变小。流体经过弯管内测时由于流体的惯性边界层脱离壁面使得阻力变小，外侧流场的扰动使内侧压力变大，从而内侧流速变大。截取弯管部分 90°截面上的速度分布，对比不同入口速度下的流场速度分布，如图 9 所示，随着流体入口速度的增大，速度分离区域有变大的趋势。

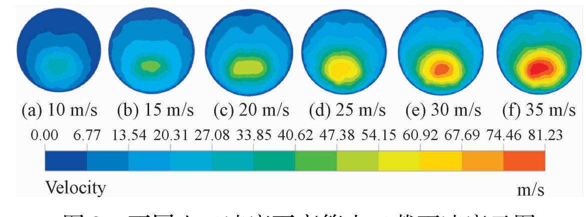


图 9 不同入口速度下弯管出口截面速度云图

Fig. 9 Velocity cloud diagram of elbow exit section at different inlet speeds

3.2 冲蚀影响因素

3.2.1 气相进口速度

连续气相进口速度对气固两相流冲蚀速率的影响如图 10 所示，对应工况为入口速度从 10 m/s 逐渐增加至 35 m/s，颗粒直径为 0.15 mm，颗粒质量流量为 1 kg/s。从图中可看出弯管的最大冲蚀速率 E_{max} 随着进口速度 v 的增大而增大，其规律近似呈指数关系，说明冲蚀速率主要由进口速度决定。当气固两相流在管道中流动时，气相流速增加，由于颗粒具有的跟随性，导致固相颗粒获得的动能更大，因此弯管的最大冲蚀速率变大。

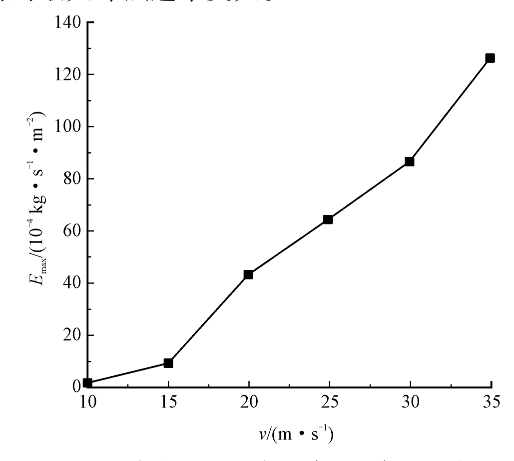


图 10 气相进口速度对冲蚀速率的影响

Fig. 10 The influence of inlet velocity on erosion rate

图 11 所示为弯管在不同角度处的冲蚀速率变化图，沿着弯管流动方向分别取 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°不同角度的截面进行分析。由图可得弯管最大冲蚀速率的发生位置为弯管沿流动方向偏转 25° ~ 30°区域范围内，冲蚀速率出现第一个峰值，

在弯管沿流动方向偏转60°左右达到二次峰值,此时峰值小于第一次峰值,造成这种现象的主要原因是由于颗粒轨迹的改变,使得在弯管的不同位置出现不同程度的冲蚀磨损。对于同一弯管角度,弯管的冲蚀速率随着入口速度的增大而增大。对同一入口速度,弯管的冲蚀速率随着弯管角度的增加有一定的波动,出现峰值,但总体上呈现出减小的趋势,这是由于颗粒与弯管壁面第一次进行碰撞后部分动量因此损失,在弯管特殊结构的作用下颗粒继续与壁面发生二次及多次碰撞,使得颗粒对壁面的冲击变小,从而冲蚀速率变小。

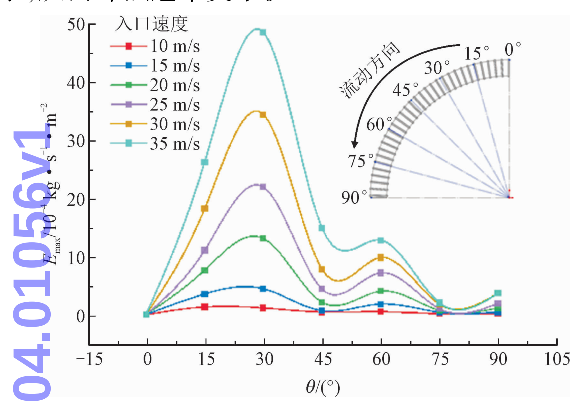


图 11　弯管不同角度处最大冲蚀速率(不同入口速度)

Fig. 11　Maximum erosion rate at different angles of elbow (different inlet velocity)

3.2.2　颗粒质量流量

颗粒质量流量对冲蚀速率的影响如图 12 所示,颗粒质量流量从 0.2 kg/s 逐渐增加至 1.0 kg/s,气相进口速度为 25 m/s,颗粒直径为 0.15 mm。由图可得弯管最大冲蚀速率 E_{max} 随着颗粒质量流量 m 的增加而增大,二者近似为线性正相关。颗粒质量流量的增加导致相同时间内与管道发生碰撞的颗粒数量增多,因此冲蚀速率变大。

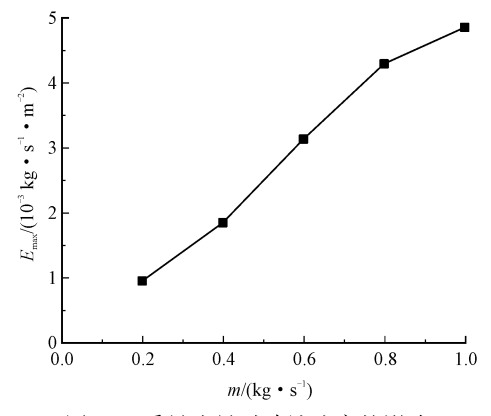


图 12　质量流量对冲蚀速率的影响

Fig. 12　The influence of mass flow on erosion rate

图 13 所示为弯管不同角度处最大冲蚀速率变化图,呈现出与图 11 相似的规律,最大冲蚀速率的发生位置为弯管沿流动方向偏转 25°~30°的区域范围内,图中出现的两个峰值对应弯管上两个不同程度的冲蚀发生区域。对于同一弯管角度,在弯管角度 45°之前冲蚀速率随着颗粒质量流量的增加而增大,但在弯管角度45°之后存在冲蚀速率随着颗粒质量流量的增加而减小的情况,ZHENG 等[18] 研究发现在颗粒质量流量增大至一定程度后,冲蚀速率的增长率随颗粒质量流量的增大而减小,因为质量流量较大时,颗粒间碰撞的概率增大,并如前所述,颗粒速度增大导致碰撞损失的动量更大,因此与弯管壁面碰撞时的动量减小从而使得冲蚀速率有所降低,从而存在同一弯管角度下随着颗粒质量流量增大最大冲蚀速率反而下降的情况。

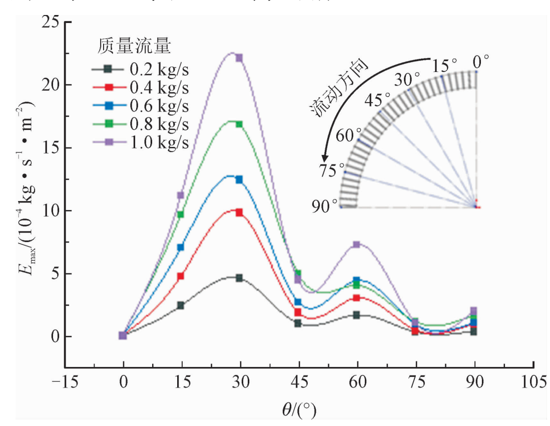


图 13　弯管不同角度处最大冲蚀速率(不同质量流量)

Fig. 13　Maximum erosion rate at different angles of elbow (different mass flow)

3.2.3　肋条及弯径比

图 14 所示为不同肋条数目对弯管最大冲蚀速率的影响,弯管肋条数目逐渐从 26 增加至 56 个,分别模拟气相进口速度为 20、25 m/s 时的弯管冲蚀情况。

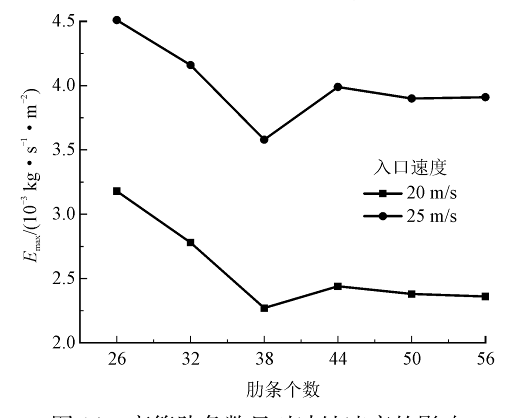


图 14　弯管肋条数目对冲蚀速率的影响

Fig. 14　The influence of the number of elbow ribs on erosion rate

由图可得弯管最大冲蚀速率 E_{max} 随着肋条数目的增加先减小后略微增大最后趋于稳定，适当增加肋条数目可以有效减小弯管的冲蚀速率。随着弯管肋条数目的增加，管道内颗粒与壁面碰撞的次数增加，颗粒的冲击动能被进一步减弱，从而使得冲蚀速率下降。随着肋条数目的继续增大，单位时间内颗粒与壁面碰撞的频率增大，冲蚀速率略微增大，当肋条数目增加到一定程度后发现再增加肋条对弯管冲蚀速率的影响较小，冲蚀速率最终趋于稳定。

从弯管冲蚀形貌可以得出冲蚀主要发生在弯管外侧，为了研究其具体分布规律取弯管外侧壁面与中心平面的交线即弯管外侧中心轮廓线上的冲蚀速率，如图 15 所示得出弯管外侧轮廓线上的冲蚀速率沿着弯管流动方向偏转角度的变化情况，同时对比了同尺寸光滑弯管外侧中心轮廓线上的冲蚀速率分布情况，光滑弯管轮廓线上的冲蚀速率变化比较平滑，而挠性弯管沿着外侧轮廓线在一定的范围内上下波动且部分位置冲蚀速率接近于 0。

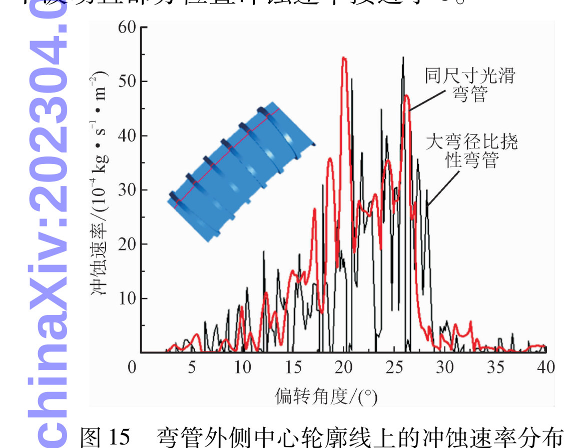


图 15　弯管外侧中心轮廓线上的冲蚀速率分布

Fig. 15　Erosion rate distribution on the outer center contour of the elbow

从图 15 可得弯管最大冲蚀速率发生在偏转角度为 26°左右，提取弯管沿流动方向偏转 26°附近一个完整肋条轮廓线上的冲蚀速率分布如图 16 所示。图例中云图为弯管中心平面上的冲蚀速率分布云图，从图中可看出肋条的上游区域几乎不存在冲蚀，而下游区域存在明显的冲蚀区域，这与弯管沿肋条轮廓冲蚀速率分布情况相符合，冲蚀速率在肋条轮廓线上先增大后减小，最大冲蚀速率发生在肋条的下游区域，即肋条背面与弯管平直段相连处。由于肋条的存在挠性弯管壁面凹凸不平，使得弯管上存在部分位置未接触到流体中的颗粒从而使得冲蚀速率为 0，这可在一定程度上缓减弯管的冲蚀。

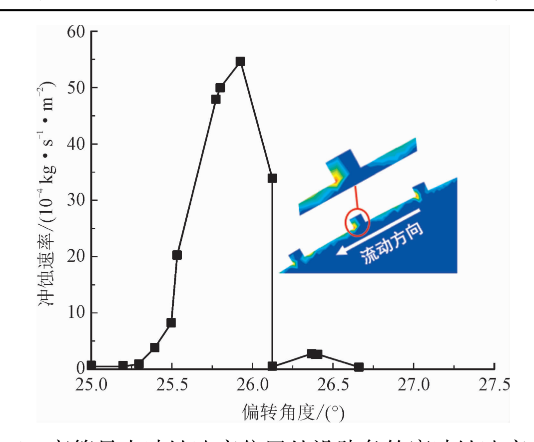


图 16　弯管最大冲蚀速率位置处沿肋条轮廓冲蚀速率分布

Fig. 16　Erosion rate distribution along rib contour at the position of maximum erosion rate of elbow

取进出口管径 $D=25$ mm，曲率半径 $R=37.5$ mm，弯径比 $R/D=1.5$ 的小弯径比光滑弯管在同一工况下进行模拟，分析对比不同弯径比弯管在不同角度处弯管截面流场速度分布，图 17 所示为不同弯径比弯管沿流动方向分别偏转 45°和 90°时弯管截面速度流场矢量图。从图中可得小弯径比光滑弯管存在明显的二次流现象，由于弯管中心流体速度较大从而所受离心力也大，导致二次流以较大的速度向弯管外侧流动，管道壁面附近的流体被迫向内侧流动，最终形成了双漩涡二次流分布。相比于小弯径比弯管，大弯径比弯管内部流场二次流现象不太明显，二次流强度较小。

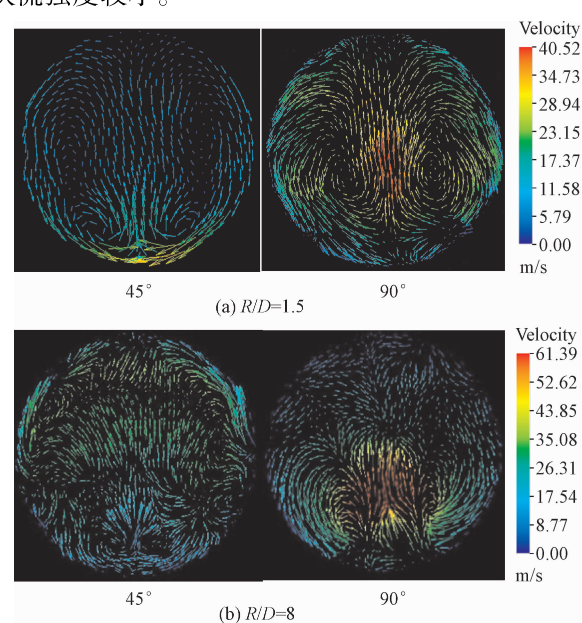


图 17　不同弯径比弯管在不同角度处弯管截面速度流场矢量图

Fig. 17　Vector diagram of the velocity flow field of the elbow with different bending diameter ratios at different angles

从图 17(b)可以看出弯管壁面附近存在低速的小漩涡,这是由于肋条的存在使得弯管壁面附近的稳定流场被破坏,从而使得此区域的湍流强度大于光滑壁面,改变将要撞击到壁面颗粒的运动方向使其流入中心流场区域,同时低速的漩涡流场会对颗粒的冲击起到一定的缓冲吸收部分动能,减轻了颗粒对壁面的冲蚀,从而流体在小弯径比光滑弯管中所引起的流动损失更严重,肋条的存在使弯管的耐冲蚀性能得到一定的提升。

3.3　冲蚀形貌及颗粒运动轨迹分析

图 18 所示为气相进口速度分别为 10 ~ 35 m/s,颗粒直径为 0.15 mm,质量流量为 1 kg/s 时的弯管冲蚀磨损速率分布云图。

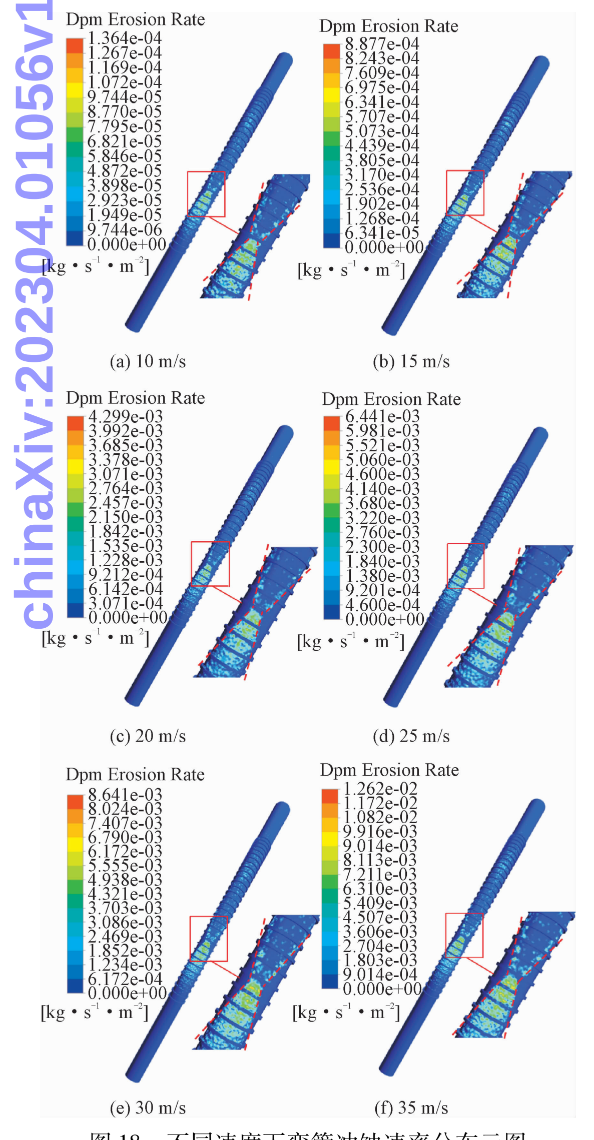


图 18　不同速度下弯管冲蚀速率分布云图

Fig. 18　Cloud diagram of erosion rate distribution of elbows at different velocity

由图可得不同速度下的弯管冲蚀形貌呈现出相同的规律,冲蚀磨损主要发生在弯管外侧,冲蚀最严重位置在弯管沿流动方向偏转 26°左右区域,冲蚀磨损呈现出 V 型冲蚀形貌,弯管处颗粒的运动轨迹表现为:颗粒与弯管进行碰撞后,其轨迹分为两条,从而出现 V 型冲蚀形貌,这与 PEREIRA、SOLNORDAL 等[19-20]发现的规律一致。在 V 型冲蚀形貌之后出现了沟槽状冲蚀形貌,主要发生在弯管沿流动方向偏转 60° ~ 80°夹角范围内,沟槽状冲蚀形貌距离 V 型冲蚀形貌较远,且冲蚀速率小于 V 型冲蚀形貌。

图 19 所示为弯管中颗粒的运动轨迹追踪图。由于弯管结构的特殊性,在运动过程中颗粒会与挠性弯管壁面以及肋条发生多次碰撞,颗粒的速度和运动方向都会发生改变,故颗粒在弯管中的运动规律复杂。颗粒从进口进入弯管后,如图 19(b)所示,与弯管壁面发生直接碰撞,产生初次碰撞并改变颗粒运动方向,从图 19(a)可得颗粒与壁面发生接触碰撞后运动方向主要沿着两个方向进行,这也与 V 型冲蚀形貌相符合。对于大弯径比弯管,初次碰撞是造成弯管冲蚀最严重位置的主要原因,故 V 型冲蚀形貌主要是由于颗粒的初次碰撞引起。经过初次碰撞后固体颗粒在弯管内反弹形成二次及多次碰撞,这也是沟槽型冲蚀形貌形成的原因。

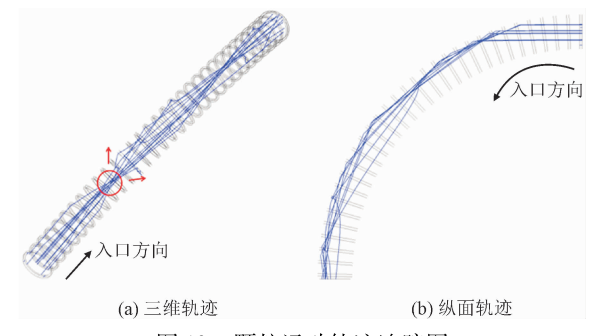


图 19　颗粒运动轨迹追踪图

Fig. 19　Particle tracking diagram

4　结　论

本研究采用离散相模型和 General 冲蚀模型,对 90°大弯径比挠性管内气固两相流的冲蚀特性开展了数值模拟研究,主要结论如下。

1)大弯径比弯管内部流场速度分布存在明显的分离现象,弯管外侧流速较小,内侧流速较大,且随着入口速度的增大速度分离区域越大。

2)气相进口速度对冲蚀速率的影响较大,弯管的最大冲蚀速率随着气相进口速度的增大而增大且

二者近似为指数关系，弯管的最大冲蚀速率随着颗粒质量流量的增大而增大且二者近似为线性关系，弯管最大冲蚀速率的发生位置大约为沿弯管流动方向偏转 26°左右。

3）弯管的最大冲蚀速率随着肋条数目的增加先减小后略微增大最后趋于稳定，适当增加肋条数目可有效减小弯管冲蚀速率。弯管外侧中心轮廓线上的冲蚀速率分布不均匀且存在冲蚀接近于 0 的区域，这是由于肋条的特殊结构导致，相比于光滑弯管，肋条可在一定程度上缓减弯管冲蚀。

4）相比于小弯径比，大弯径比弯管内，流动的二次流强度小且肋条的存在使弯管的耐冲蚀性能得到一定的提升。

5）弯管的冲蚀磨损主要发生在弯管外侧，冲蚀最严重区域发生在弯管 26°左右并且呈现 V 型冲蚀形貌。在弯管 60° ~ 80°范围内出现沟槽状冲蚀形貌，此时冲蚀速率小于 V 型冲蚀形貌。

参考文献：

[1] 郝负洪，邢永明，杨诗婷，等. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究［J］. 应用力学学报，2013，30（3）：350-355，473.
HAO Yuanhong，XING Yongming，YANG Shiting，et al. The erosion-wear mechanical properties of the coating of steel structure subject to sandstorm［J］. Chinese journal of applied mechanics，2013，30（3）：350-355，473（in Chinese）.

[2] EDWARDS J K，MCLAURY B S，SHIRAZI S A. Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees［J］. Journal of energy resources technology，2001，123（4）：277-284.

[3] CHEN X H，MCLAURY B S，SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics（CFD）-based erosion prediction model in elbows and plugged tees［J］. Computers & fluids，2004，33（10）：1251-1272.

[4] SINGH J，SINGH J P. Numerical analysis on solid particle erosion in elbow of a slurry conveying circuit［J］. Journal of pipeline systems engineering and practice，2021，12（1）：04020070.

[5] SONG X Q，LIN J Z，ZHAO J F，et al. Research on reducing erosion by adding ribs on the wall in particulate two-phase flows［J］. Wear，1996，193（1）：1-7.

[6] 林建忠，吴法理，余钊圣. 一种减轻固粒对壁面冲蚀磨损的新方法［J］. 摩擦学学报，2003，23（3）：231-235.
LIN Jianzhong，WU Fali，YU Zhaosheng. A new way to reduce wall erosion caused by solid particles［J］. Tribology，2003，23（3）：231-235（in Chinese）.

[7] 季楚凌，李长俊，马树锋，等. 弯管仿生耐磨方法数值模拟［J］. 中南大学学报（自然科学版），2016，47（10）：3582-3589.
JI Chuling，LI Changjun，MA Shufeng，et al. Numerical simulation of bionic method for improving property of elbow erosion resistance［J］. Journal of Central South University（science and technology），2016，47（10）：3582-3589（in Chinese）.

[8] ZHANG H，TAN Y Q，YANG D M，et al. Numerical investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbow：Effect of slurry velocity，bend orientation and angle of elbow［J］. Powder technology，2012，217：467-476.

[9] PENG W S，CAO X W. Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid-solid flow［J］. Powder technology，2016，294：266-279.

[10] WANG J R，SHIRAZI S A. A CFD based correlation for erosion factor for long-radius elbows and bends［J］. Journal of energy resources technology，2003，125（1）：26-34.

[11] 杨弓熠，白长青. 飞机环控系统气固两相流动力特性研究［J］. 应用力学学报，2020，37（4）：1406-1414.
YANG Gongyi，BAI Changqing. Research on dynamic characteristics of the gas-solid two-phase flow in environmental control system of airplane［J］. Chinese journal of applied mechanics，2020，37（4）：1406-1414（in Chinese）.

[12] PARSI M，NAJMI K，NAJAFIFARD F，et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications［J］. Journal of natural gas science and engineering，2014，21：850-873.

[13] GOLDSCHMIDT M J V，KUIPERS J A M，VAN SWAAIJ W P M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds using the kinetic theory of granular flow：Effect of coefficient of restitution on bed dynamics［J］. Chemical engineering science，2001，56（2）：571-578.

[14] FORDER A，THEW M，HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves［J］. Wear，1998，216（2）：184-193.

[15] HUSER A，KVERNVOLD O. Prediction of sand erosion in process and pipe components［C］//North American Conference on Multiphase Technology. United Kingdom：Professional Engineering Publishing Ltd，1998：217-227.

[16] 叶健. 煤液化管道材料冲蚀磨损试验与数值研究［D］. 杭州：浙江理工大学，2013.

[17] VIEIRA R E，MANSOURI A，MCLAURY B S，et al. Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow［J］. Powder technology，2016，288：339-353.

[18] ZHENG Y G，YU H，JIANG S L，et al. Effect of the sea mud on erosion-corrosion behaviors of carbon steel and low alloy steel in 2.4% NaCl solution［J］. Wear，2008，264（11/12）：1051-1058.

[19] PEREIRA G C，DE SOUZA F J，DE MORO MARTINS D A. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows［J］. Powder technology，2014，261：105-117.

[20] SOLNORDAL C B，WONG C Y，BOULANGER J. An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow［J］. Wear，2015，336/337：43-57.

（编辑　李坤璐）